A Qualitative Phenomenological Framework for Void-Triggered Dark Energy

Автор: Зонин Евгений Анатольевич
Аффилиация: Независимый исследователь, Россия
Версия 10.1 (финальная, полностью готовая к подаче)

Аннотация

Предложен качественный феноменологический framework, в котором эффективная космологическая постоянная может «включаться» в областях с плотностью материи ниже критического порога. Мы параметризуем плотность тёмной энергии (ТЭ) сигмоидной функцией локальной плотности материи и записываем общее модифицированное уравнение Фридмана. В отличие от предыдущих версий, мы не делаем количественных оценок параметров, поскольку обнаружили фундаментальное противоречие между стандартным логнормальным приближением для распределения плотности и наблюдаемой объёмной долей войдов при низком критическом пороге. Это противоречие означает, что модель в текущем виде не может быть откалибрована без привлечения реальных данных о функции распределения плотности из N-body симуляций или наблюдений. Мы честно обсуждаем это ограничение и формулируем качественные сигнатуры (анти-линзирование в глубоких войдах, усиленный ISW-эффект, избыток крупных войдов), которые могут быть проверены после калибровки. Framework завершает цикл исследований, начатый с качественной гипотезы о «полевом разрушении самоорганизации квантов пространства», и приглашает сообщество к дальнейшему количественному анализу. Предложен конкретный план калибровки с использованием publicly available данных SDSS и симуляций IllustrisTNG.

1. Введение

Стандартная ΛCDM-модель [1] оставляет необъяснённой проблему совпадения: почему ускоренное расширение началось около 7 млрд лет назад ($z \approx 0.67$). Модели динамической ТЭ и скрининга [2,3] предлагают механизмы, но обычно не дают естественного объяснения временно́му перелому. Настоящая работа завершает цикл исследований, начатый с качественной гипотезы о «полевом разрушении самоорганизации квантов пространства». Мы прошли путь от попыток построения микроскопических моделей (Симметрон, Хамелеон) до данного феноменологического framework, и на каждом этапе честно фиксировали возникающие трудности. Здесь мы формулируем итоговый качественный framework, пригодный для направления наблюдательных поисков и не зависящий от конкретной микрофизики.

2. Феноменологический framework

2.1. Постулат

Плотность ТЭ плавно зависит от локальной плотности материи через сигмоиду:

[\boxed{\rho_\Lambda(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho_{\rm DE}}{1 + \exp!\big[-\kappa, (\rho_{\rm crit} - \rho_m(\mathbf{x}, t)) / \sigma_\kappa\big]}, } \tag{1}]

где ρ_DE — плотность ТЭ в глубоких войдах, ρ_crit — критическая плотность, σ_κ — характерная ширина перехода, κ — безразмерный параметр крутизны. Эффективное число свободных параметров — три: Ω_DE ≡ ρ_DE/ρ_{c0}, ρ_crit и комбинация κ/σ_κ.

2.2. Усреднение и уравнение Фридмана

Средняя по объёму плотность ТЭ:

[\bar{\rho}*Lambda(z) = \rho*{\rm DE}, f(z), \qquad f(z) = \int_0^\infty P(\rho_m, z), \frac{1}{1 + \exp[-\kappa (\rho_{\rm crit} - \rho_m)/\sigma_\kappa]}, d\rho_m, \tag{2}]

где P(ρ_m, z) — функция распределения плотности материи. Модифицированное уравнение Фридмана:

[\boxed{H^2(z) = H_0^2 \big[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + \Omega_{\rm DE}, f(z) \big]}. \tag{3}]

Ускоренное расширение начинается при 2 Ω_DE f(z_acc) = Ω_m (1+z_acc)³.

2.3. Фундаментальная проблема: неизвестная функция распределения плотности

Для количественных предсказаний необходимо знать P(ρ_m, z). Стандартным приближением является логнормальное распределение с дисперсией, определяемой σ_8 [1]. Однако простой численный анализ показывает фундаментальную трудность.

Наблюдения указывают, что объёмная доля войдов сегодня составляет f(0) ≈ 0.7 [4]. Чтобы получить такую долю при логнормальном распределении с σ_8 ≈ 0.81, критический порог должен быть близок к средней плотности: ρ_crit ≈ (0.8–1.0) \bar{\rho}_m(0). Это противоречит исходной идее о включении ТЭ именно в **глубоких** войдах, где плотность значительно ниже средней. Если же установить порог на уровне ~0.3 \bar{\rho}_m(0), как предполагалось в нашей качественной картине, логнормальная модель даёт f(0) ≈ 0.14, что несовместимо с наблюдаемой долей войдов и не обеспечивает начало ускорения к z≈0.67.

Это противоречие означает, что стандартное логнормальное приближение **непригодно** для количественной калибровки нашего framework без модификации. Возможные пути решения включают: (а) использование более реалистичных распределений плотности, извлечённых из N-body симуляций или наблюдений; (б) отказ от предположения о низком пороге и пересмотр физической картины. В любом случае, количественная калибровка модели требует отдельного исследования и выходит за рамки данной работы.

Таким образом, мы воздерживаемся от каких-либо количественных оценок параметров (Ω_DE, ρ_crit, κ/σ_κ) и от сравнения с конкретными наборами данных. Вся дальнейшая ценность framework состоит в формулировке качественных наблюдательных сигнатур, которые не зависят от точных значений параметров и могут быть проверены после того, как функция f(z) будет надёжно определена.

3. Качественные наблюдательные сигнатуры

Независимо от конкретных значений параметров, любая модель, в которой ТЭ появляется в областях пониженной плотности, должна проявлять следующие качественные эффекты.

Важное замечание о фальсифицируемости. Обнаружение любой из перечисленных ниже сигнатур станет сильным подтверждением framework. Однако отсутствие сигнала не обязательно опровергает его, поскольку амплитуда эффектов критически зависит от неизвестных пока параметров (ρ_crit, κ/σ_κ) и от функции распределения плотности P(ρ_m, z). Независимое определение этих величин необходимо для превращения качественных ожиданий в строгие проверяемые предсказания.

3.1. Гравитационное линзирование в войдах

Избыток ТЭ в войдах создаёт эффективный антигравитационный потенциал, что приводит к **дефокусировке** (анти-линзированию) света, проходящего через центр войда. Это качественно отличается от стандартной ΛCDM, где ТЭ однородна и не создаёт дополнительного линзирования. Сигнал должен быть наиболее заметен в глубоких войдах и может быть выделен статистически по данным Euclid [5].

3.2. Интегрированный эффект Сакса–Вольфа

Изменение гравитационного потенциала во времени при включении ТЭ на границах войдов создаёт дополнительный вклад в ISW. Ожидается усиление кросс-корреляции между картами реликтового излучения и каталогами войдов на угловых масштабах в несколько градусов.

3.3. Статистика войдов

Войды, заполненные ТЭ, должны расширяться быстрее, чем в ΛCDM. Это приведёт к избытку крупных войдов (радиусом $\gtrsim 20$ Мпк) при $z \lesssim 0.7$ по сравнению со стандартной моделью. Эффект может быть обнаружен в будущих обзорах, таких как Euclid и Roman Space Telescope.

4. История расширения и рост структур (качественно)

Модель предсказывает переход эффективного уравнения состояния от w_eff ≈ 0 (пыль) при высоких z к w_eff → −1 при низких z, когда доля войдов становится значительной. Темп роста структур на ранних стадиях ($z \gtrsim 1$) должен быть выше, чем в ΛCDM, поскольку ТЭ отсутствует. Это качественное предсказание может быть проверено данными DESI и Euclid после калибровки f(z).

---

5. Уроки попыток микроскопического построения

Попытки реализовать идею «включения ТЭ в войдах» в рамках конкретных моделей скалярных полей — Симметрона [2] и Хамелеона [3] — выявили фундаментальную несовместимость. Требования макроскопического размера войдов (толщина доменной стенки δ 10 Мпк), времени начала ускорения (ρ_* ρ_{c0}) и лабораторного подавления пятой

силы ($m_{eff} \gtrsim 10^{-2}$ эВ в лаборатории) не могут быть удовлетворены одновременно в рамках простейших однополевых моделей. Этот отрицательный результат указывает на необходимость принципиально новых физических механизмов для микроскопической реализации идеи.

6. Обсуждение и будущие шаги

Статус framework. Данная работа представляет собой **качественный феноменологический framework**. Он не содержит количественных предсказаний, которые можно было бы непосредственно сравнивать с данными. Его ценность — в формулировке конкретных качественных сигнатур и в явном указании на необходимость решения проблемы калибровки $f(z)$.

Конкретный план калибровки. Для превращения framework в количественную модель мы предлагаем следующие первоочередные шаги:

- (а) Извлечь функцию распределения плотности $P(\rho_m, z)$ напрямую из publicly available каталогов войдов (SDSS DR16, DES Y3) и N-body симуляций (IllustrisTNG, MillenniumTNG).
- (б) Для каждого красного смещения вычислить долю объёма $f(z)$ с плотностью ниже заданного порога.
- (в) Откалибровать параметры модели (Ω_{DE}, ρ_{crit}, κ/σ_κ) так, чтобы выполнялось условие начала ускорения и ограничения на рост структур из существующих данных.

Проблема несохранения энергии-импульса. Постулат (1) не выводится из вариационного принципа. В полной теории необходимо обеспечить ковариантное сохранение тензора энергии-импульса, что может модифицировать уравнение для роста возмущений. В данном framework мы пренебрегаем этим эффектом, оставляя его для будущего анализа.

7. Заключение

Мы представили качественный феноменологический framework, в котором тёмная энергия может включаться в областях с плотностью материи ниже критического порога. Framework не содержит количественных предсказаний из-за фундаментальной неопределённости в функции распределения плотности материи $P(\rho_m, z)$, однако формулирует конкретные качественные сигнатуры, которые могут быть проверены будущими миссиями: анти-линзирование в глубоких войдах, усиленный ISW-эффект и избыток крупных войдов. Эти сигнатуры не зависят от точных значений параметров, но их амплитуда — зависит; следовательно, обнаружение сигнала станет сильным подтверждением framework, а отсутствие сигнала потребует независимого знания параметров для окончательных выводов.

Мы приглашаем сообщество к решению ключевой задачи — определению $f(z)$ из данных или симуляций согласно предложенному плану, — что позволит превратить этот framework в полноценную количественную модель и подвергнуть её строгой наблюдательной проверке.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность анонимным рецензентам за беспрецедентно тщательную и конструктивную критику на всех этапах работы. Особая благодарность за выявление критического противоречия между логнормальной моделью и наблюдаемой долей войдов, что позволило избежать публикации количественно несостоятельных результатов и привело к созданию данного честного framework.

Список литературы

[1] Planck Collaboration. (2020). *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. [2] Hinterbichler, K., & Khoury, J. (2010). *Physical Review Letters*, 104(23), 231301. [3] Khoury, J., & Weltman, A. (2004). *Physical Review D*, 69(4), 044026. [4] Cautun, M., et al. (2014). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(4), 2923–2933. [5] Laureijs, R., et al. (2011). Euclid Definition Study Report. arXiv:1110.3193.

КОНЕЦ СТАТЬИ